

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zjištění závislosti spotřeby zemního plynu na ohřev
válcovaného materiálu

Relationship between Natural Gas Consumption
and Type of Rolled Product

Student:

Jiří Kopta

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.

Ostrava 2009

Zadání bakalářské práce

Student:

Jiří Kopta

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3907R004 Provoz a řízení v energetice

Téma:

Zjištění závislosti spotřeby zemního plynu na ohřev válcovaného materiálu

Study of Relationship between Natural Gas Consumption and Type of Rolled Product

Zásady pro vypracování:

Zjistěte závislost spotřeby zemního plynu na ohřev válcovaného sortimentu, vstupních rozměrech a entalpii sázených bram

- popište válcovnu bram
- proveďte tepelnou bilanci ohřívací pece
- vypočítejte ohřev brámy v peci a dále chladnutí na volném vzduchu, než se brama dostane do válcovací stolice

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] BLAHOŽ, V., KADLEC, Z. Základy sdílení tepla. 2.vyd. Ostrava: Cicero, 2000. 110 s. Edice SPBI Spektrum, ISBN 80-902001-1-7

[2] ŠORIN, S., N. Sdílení tepla. 1.vyd. Praha: SNTL, 1968. 398 s.

[3] SAZIMA, M., KMONÍČEK, V., SCHNELER, J. Teplo. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. 588 s. Technický průvodce. ISBN 80-03-00043-2.

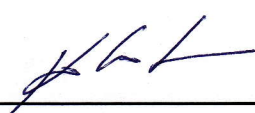
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Kadlec, Ph.D.**

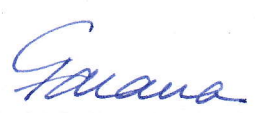
Datum zadání: 29.09.2008

Datum odevzdání: 22.05.2009





prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....
podpis studenta



ArcelorMittal

Evidenční číslo 25/2007-8

**Dohoda
o zabezpečení bezplatné odborné práce studentů vysokých škol**

ArcelorMittal Ostrava a.s., Vratimovská 689, 707 02 Ostrava-Kunčice

zastoupená Mgr. Ctíradem LOLKEM

na straně jedné

a

škola Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní,
17. listopadu 15/2172, Ostrava – Poruba 708 33

zastoupená
(dále jen škola)

prof. Ing. Radim Farana, CSc.

na straně druhé

uzavírají Dohodu o zabezpečení bezplatné odborné práce studentů vysokých škol

1 ArcelorMittal Ostrava a.s.:

- 1.1 zajistí podmínky pro zabezpečení odborné práce
- 1.2 pověří organizací vedení odborné práce svého zaměstnance:
p. Libuši Urbancovou
- 1.3 stanoví jako konzultanta svého zaměstnance:
p. Lumíra Blahoše
- 1.4 seznámí studenty s předpisy k zajištění bezpečnosti práce a ochrany
zdraví při práci
- 1.5 zajistí studentům potřebné ochranné pomůcky a prostředky (kromě
pracovní obuvi a oděvu)
- 1.6 nesouhlasí s volným přístupem k výsledkům řešení této práce, v
případě zájmu o výsledky práce je nutno požádat zadavatele o
písemný souhlas s jejich zveřejněním

2 Škola:

2.1 doporučí pro zpracování odborné práce v podmínkách společnosti ArcelorMittal Ostrava a.s. studenta strojí fakulty

v počtu 1..... v termínu 5/2008-4/2009

2.2 pověří vedením odborné práce svého zaměstnance:

2.3 uvede školení rok obhajoby odborné práce: 2009

3 Další ustanovení:

Student je povinen předat útvaru JK-Hodnocení a kariéra jeden nesvázaný výtisk (příp. disketu nebo CD-room) své odborné práce pro potřeby ArcelorMittal Ostrava a.s.

4 Studentovi po dobu působení ve společnosti ArcelorMittal Ostrava a.s. v rámci zpracování odborné práce nepřísluší finanční odměna.

5 Tato Dohoda o zabezpečení odborné práce studentů vysokých škol je uzavřena pro studenta*:

Jméno a příjmení: Jiří Kopta

Bydliště: Na Hranici 956, Petřvald, 735 41

Datum narození: 2. 4. 1987

6 Téma odborné práce: „Zjištění závislosti spotřeby zemního plynu na válcovaném sortimentu pásu, vstupních rozměrech bram a entalpii sázených bram“

7 Dohoda o zabezpečení odborné práce studentů vysokých škol je vyhotovena ve dvou stejnopisech, přičemž jeden obdrží ArcelorMittal Ostrava a.s. a jeden obdrží škola.

ArcelorMittal Ostrava a.s.

ArcelorMittal

ArcelorMittal Ostrava a.s.
Vratimovská 689, 707 02 Ostrava 7
Ředitel pro personálistiku

122

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta strojí
708 33 OSTRAVA - Poruba
15

Škola:

V Ostravě dne: 20. května 2008

*) - v případě většího počtu studentů než 1 bude seznam studentů s výše stanovenými údaji uveden ve zvláštní příloze

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KOPTA, J. Zjištění závislosti spotřeby zemního plynu na ohřev válcovaného materiálu. Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2009, 37 s. Bakalářská práce, vedoucí Kadlec, Z.

Bakalářská práce se zabývá přípravou materiálu před válcováním. V úvodu je popsána technologie výroby závodu Minihut' společnosti ArcelorMittal. Na základě naměřených a zadaných hodnot je spočtena energetická bilance ohřívací pece, doba pro ohřev materiálu a průběh chladnutí materiálu po vytažení z pece.

Ohřev a chladnutí jsou řešeny dvourozměrně, aby bylo lépe vidět rozložení tepla v daném materiálu. Zvláštní součástí práce jsou soubory ve formátu .xslm, pomocí nichž lze provádět výpočty pro jiné hodnoty, než původně zadané.

ANNOTATION OF THESIS

KOPTA, J. Study of Relationship between Natural Gas Consumption and Type of Rolled Product. Ostrava: Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering VŠB - Technical University of Ostrava, 2009, 37 p. Thesis, head: Kadlec, Z.

Thesis is dealing with preparation of material before the rolling. The introduction compares technology of producing in Minihut' plant – ArcelorMittal. On the basis of measured and required values are counted the energy balance of heating furnace, ideal heating times and the model of the cooling of the material after the removal from the furnace.

Results of the heating and the cooling are in 2D solution for the better sight of the heat distribution in the material. Special parts of work are .xslm files, whereby can be counted new results for other values, then primary measured.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	3
1. Úvod	5
2. Technologie výroby na závodě 16 – Minihut' Pásová.....	6
2.1. Definice minihuti	6
2.2. Ocelářský komplex.....	7
2.2.1. Výroba oceli.....	7
2.2.2. Úprava vyrobené oceli	7
2.2.3. Odlévání oceli	8
2.3. Válcovářský komplex – trat' Steckel P-1500	10
2.3.1. Výrobní program válcovací tratě	11
2.3.2. Zařízení tratě P-1500	11
2.3.3. Pecní úsek	12
2.3.4. Válcovací úsek.....	14
2.3.5. Úsek laminárního chlazení a navíječka svitků.....	15
2.4. Materiál	15
2.4.1. Základní nabídka.....	16
2.4.2. Rozšířená nabídka.....	16
3. Tepelná bilance krokové pece	18
3.1. Ztráty chlazením.....	18
3.2. Ztráty sáláním do okolí	19
3.2.1. Rekuperace.....	19
3.2.2. Předehřev a 1.část ohřevu	25
3.2.3. 2.část ohřevu a vyrovnávání	27
3.3. Ztráta ve spalínách	29
4. Výpočet ohřevu bramy v peci.....	30
4.1. Ohřev v rekuperaci	30
4.2. Ohřev v oblasti předehřevu a 1. části ohřevu	32
4.3. Ohřev v oblasti 2. části ohřevu a vyrovnávání.....	32
5. Průběh chladnutí bramy.....	33

6.	Vliv na spotřebu plynu	34
7.	Závěr.....	35
8.	Použitá literatura a zdroje	36
9.	Seznam příloh.....	37

Seznam použitých značek a symbolů

A	[1]	absorbivita, měrná pohltivost
Bi	[1]	Biotovo kritérium
Fo	[1]	Fourierovo kritérium
Gr	[1]	Grashofovo kritérium
L	[m]	charakteristický rozměr
Nu	[1]	Nusseltovo kritérium
O	[m]	obvod
P	[W]	výkon
Pr	[1]	Prandtlovo kritérium
\dot{Q}	[W]	výkon
Re	[1]	Reynoldsovo kritérium
S	[m ²]	plocha
T	[K]	termodynamická teplota
V	[m ³]	objem
\dot{V}	[m ³ .s ⁻¹]	průtok
a	[m ² .s ⁻¹]	součinitel teplotní vodivosti
c _p	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku
d _h	[m]	hydraulický průměr
g	[m.s ⁻²]	tíhové zrychlení
k	[W. m ⁻² .K ⁻¹]	prostup tepla stěnou
l	[m]	účinná tloušťka vrstvy
m	[kg]	hmotnost
n	[1]	přebytek vzduchu
p	[Pa]	tlak
q	[W. m ⁻²]	tepelný tok
w	[m.s ⁻¹]	rychlost

řecká písmena

α	[W. m ⁻² .K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
β	[1]	korekční součinitel záření plynů
γ	[K ⁻¹]	objemová tepelná roztažnost

ε	[1]	emisivita, poměrná zářivost
$\varepsilon_{1,2}$	[1]	stupeň černosti soustavy
λ	[W. m ⁻¹ .K ⁻¹]	tepelná vodivost
ν	[m ² .s ⁻¹]	kinematická viskozita
ξ	[%]	ztráty
ρ	[kg.m ⁻³]	hustota
σ	[W. m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmanova konstanta
τ	[s]	čas
ω	[%]	koncentrace

indexy

CO ₂	oxid uhličitý
H ₂ O	voda
k	konvekce
o	okolí
p	plyn
pl	plamen
s	stěna
sp	spaliny
vz	vzduch

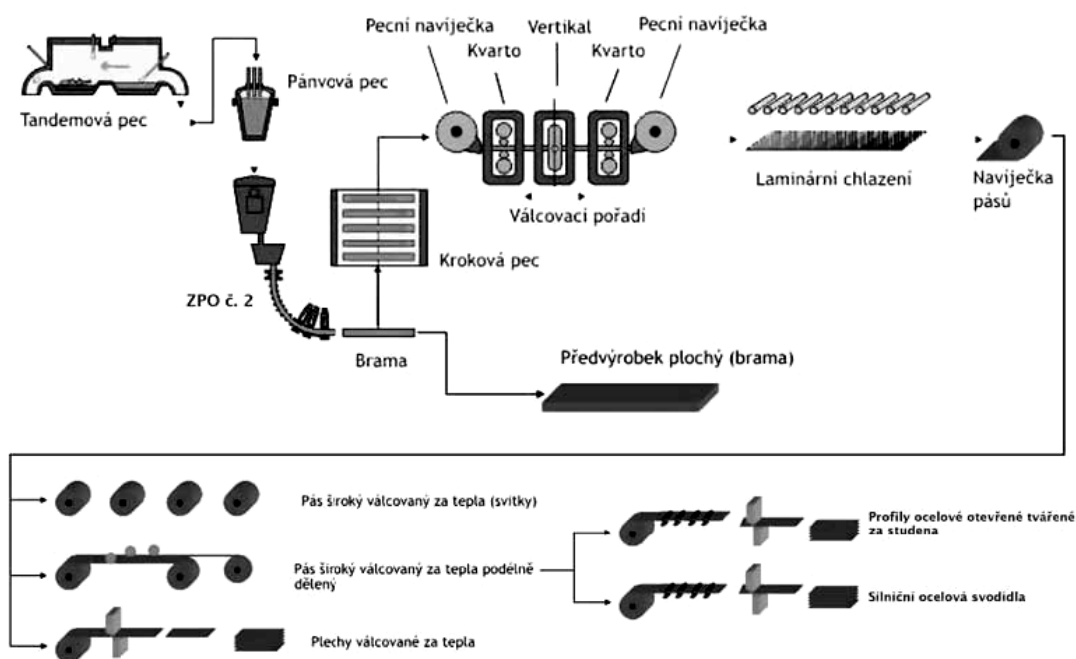
1. Úvod

Společnost ArcelorMittal Ostrava a.s., která je součástí největší hutnické společnosti na světě – ArcelorMittal, je největším hutnickým podnikem v České republice. Její nedílnou součástí je Závod 14 – Minihuť pásová (dále Minihuť), ve kterém se vyrábí za tepla válcované ploché výrobky tvořící značné množství vyrobené oceli – cca 25 %. V letech 1997 až 1999 dochází k modernizaci výrobního zařízení pro výrobu pásů válcovaných za tepla. Bramové kontilít bylo zprovozněno v roce 1997 a o dva roky později došlo ke stavbě nové širokopásové válcovací trati P – 1500 Steckel. Výrobní kapacita této trati je 1,27 miliónu tun za tepla válcovaných širokých pásů ročně. Díky tomu se mohl rozšířit výrobní sortiment pásů jak z hlediska rozměrů a kvality, tak i nových jakostí a značek ocelí určených pro výrobu za tepla válcovaných pásů.

S rostoucí cenou nerostných surovin je mnoho podniků donuceno podřídit se vyvíjejícímu trendu a optimalizovat své výrobní procesy. Z tohoto důvodu je úkolem bakalářské práce stanovení tepelné bilance pece, stanovení optimální délky ohřevu bramy v krokovací peci v závislosti na jejich rozměrech, sázecí teplotě a jakosti. Dalším požadavkem ze strany zadavatele je vytvořit model chladnutí bramy po vytažení z pece, a to z důvodu zastavení či blokace válcovací linky, čímž by došlo ke změně vstupních parametrů bramy do válcovacího cyklu. Dle zadavatele bude tato práce zaměřena na bramy o délkách 12, 15 a 18 m, šířkách 1000, 1250 a 1500 mm, vsázecí teplotě 800, 900 a 1000 °C a výstupní teplotě 1230, 1260 a 1290 °C.

2. Technologie výroby na závodě 16 – Minihut' Pásová

Výroba válcovaných pásů za tepla je složitým výrobním procesem skládajícím se z mnoha moderních technologií. Technologický proces na Minihuti zahrnuje technologie úpravy vyrobené oceli, jejího odlévání do bram, ohřevu na požadovanou teplotu před válcováním, samotné válcování a přípravě výrobků k expedici (Obr. 2.1).



Obr. 2.1 Schéma výrobního procesu na Minihuti [1]

2.1. Definice minihuti

S pojmem *minihut'* se můžeme setkat již na počátku 60. let minulého století, kdy byly takto označovány malé hutní závody s ocelárnou a válcovnou vyrábějící malý sortiment výrobku (jemné profily, válcované dráty). Kapacita se v raných dobách těchto podniků pohybovala kolem 100 kt/rok. V porovnání s velkými hutnickými závody byly mnohem více rentabilnější, a proto se jejich koncepce výroby rozšířila o další výrobky, především výrobky ploché.

V dnešní době si lze s názvem minihut' spojit hutní závod pro výrobu určitých výrobků. Výrobní kapacita se pohybuje okolo 0,5 – 1,5 mil.t/rok. Nicméně lze za určitých podmínek dosáhnout výroby až 2 mil.t/rok. [2]

Komplex minihutě obvykle tvoří:

Ocelářenský komplex

- ocelárna s vybavenou elektrickou pecí pracující se šrotem
- pánvová pec pro zajištění sekundární metalurgie
- zařízení pro plynulé lití oceli (dále jen ZPO) formátu, tvarově i rozměrově podobného konečnému výrobku

Válcovenský komplex

- ohřívací pec
- válcovací trať
- zařízení pro manipulaci a skladování svitků
- dělicí a profilovací linky

2.2.Ocelářenský komplex

2.2.1. Výroba oceli

Ocel pro výrobu plochých výrobků se vyrábí v závodě 13 – *Ocelárna*. Výrobní proces probíhá ve 200 tunových sklopných tandemových pecích. Základ kovonosné vsázky je tvořen ze 2/3 tekutým surovým železem a zbytek (cca 1/3) tvoří ocelový odpad, šrot, železná houba nebo pevné surové železo. [1]

Tandemové pece jsou konstrukčně i parametrově stejné. Doba mezi dvěma odpichy tandemové pece se pohybuje od 80 do 85 min. Po ukončení odpichu je tekutá ocel převezena do ocelářenského komplexu minihutě v zakrytých licích pánvích na speciálně konstruovaných železničních vagónech. Vzdálenost 1500 m musí vagóny překonat do 30 min. Během přepravy se ocel promíchává *argonem*. [3]

2.2.2. Úprava vyrobené oceli

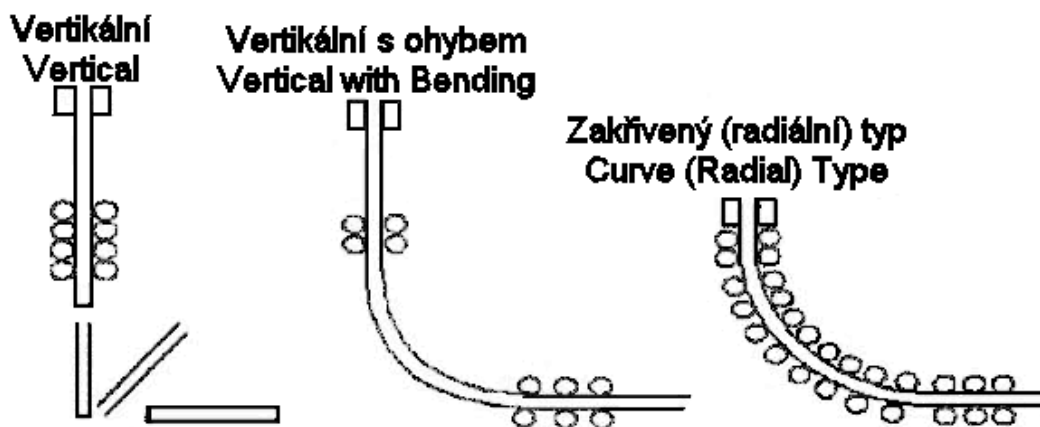
Výrobní proces Minihutě začíná momentem, kdy je na stanoviště pánvové pece přistavena pánev s tekutou ocelí. Doba upravovacího procesu činí maximálně 45 minut.

Na pánvové peci probíhají následující výrobní operace:

- teplotní a chemická homogenizace
- desoxidace oceli
- přesné nalegování na požadované chemické složení oceli
- odsíření oceli
- snížení obsahu nekovových vměstků
- úprava teploty na předepsanou teplotu odlévání.

2.2.3. Odlévání oceli [6]

Po ukončení sekundárního zpracování oceli na stanovišti pánvové pece je lící pánve s tekutou ocelí usazena do otočného lícího stojanu na *zařízení plynulého odlévání*. Typ ZPO je vybrán podle konečného výrobku. V případě lití bram se používá ve většině ZPO radiálního typu, na Minihuti vertikálního typu s ohybem (Obr. 2.2). Kořeny plynulého odlévání (*kontilití*) sahají k počátku 50. let minulého století. Předtím se ocel odlévala do stojatých forem do tvaru ingotů. Procesem kontilití však došlo k výraznému zvýšení kvality oceli a zefektivnění výrobního procesu. V dnešní době představuje hlavní technologii výroby oceli.

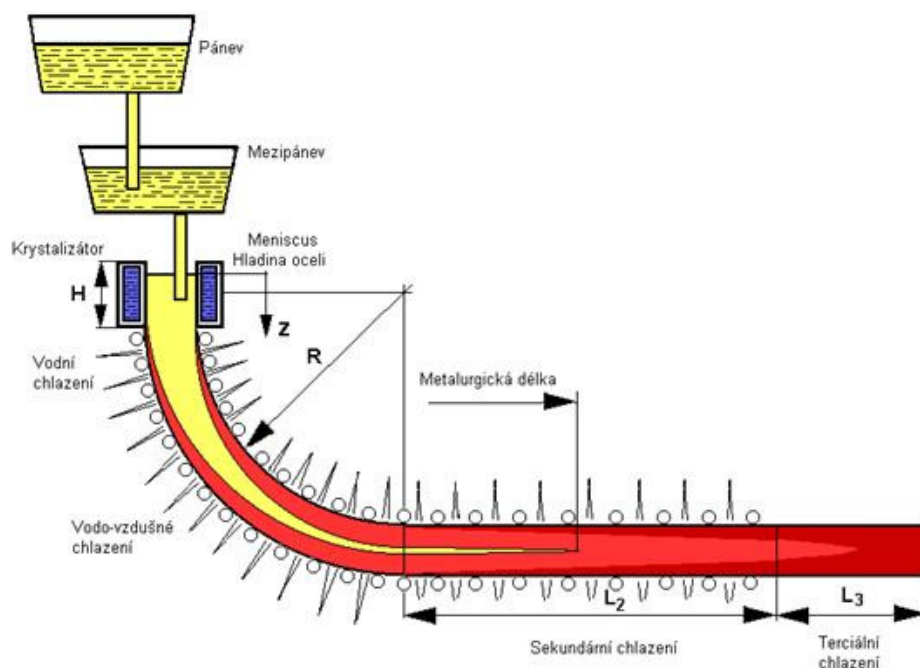


Obr. 2.2 Typy zařízení plynulého odlévání [6]

Z lící pánve je ocel odlévána stínicí keramickou trubicí do *mezipánve* a odtud do vodou chlazeného *krystalizátoru* (Obr. 2.3). Mezipánve bývá většinou obdélníkového tvaru, případně tvaru Δ či „T“. Její rozměry jsou v rozmezí 8 – 10 % velikosti lící pánve. Po jejím zaplnění dochází k otevření lících proudů a následnému plnění krystalizátoru. Šířku předlitku lze v průběhu odlévání do krystalizátoru měnit.

Hlavní funkce mezipánve:

- Napomáhá separaci oxidů
- Zabraňuje vniknutí strusky do krystalizátoru
- Zajišťuje kontinuální tok tekuté oceli během výměny pánve
- Udržuje stacionární výšku kovu nad tryskami do krystalizátoru, aby se udržel konstantní tok a udržela konstantní rychlost lití
- Rozděluje ocel do jednotlivých lících proudů
- Zásobuje stabilním proudem krystalizátor (y)



Obr. 2.3 Schéma bramového kontilití [6]

Krystalizátor je zařízení krabicového tvaru sloužící k vytvoření tuhé skořepiny, která má za úkol udržet obsah tekutého jádra při vstupu proudu do zóny sekundárního chlazení. Krystalizátory se vyrábějí ze slitin mědi. Jejich pracovní povrch (vnitřní stěny) bývá pokryt chromem či niklem, což ztvrdzuje pracovní povrch a zabráňuje vazbám oceli na měď. Odvod tepla je zajištěn vodou procházející kanálky ve stěnách krystalizátoru. Tato oblast se nazývá *oblastí primárního chlazení*. V krystalizátoru je celkově odvedeno cca 10 – 30 % veškerého tepla z předlitku.

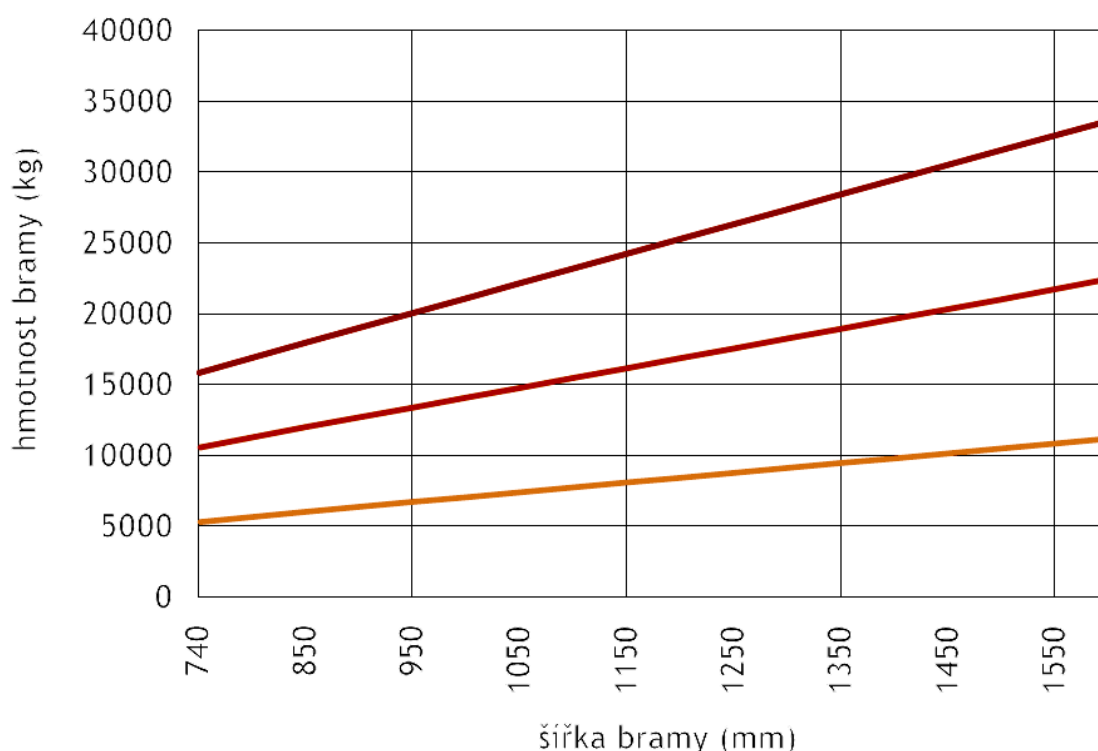
Při začátku lití do krystalizátoru je v jeho dolní části uzavírací látka. Na ní bývají často umístěny látky podporující vznik krystalizačních zárodků. Tekutá ocel tedy nejprve tuhne na ploše zátky, postupem se vytváří na stěnách krystalizátoru ztuhlá licí kůra. Aby nedošlo k protržení štěrbin a následnému *průvalu*, krystalizátor osciluje, což zmenšuje jeho tření se skořepinou. K další minimalizaci tření slouží licí prášky či oleje. Správný odvod tepla z krystalizátoru je velmi složitý proces, který je závislý na mnoha faktorech. K jeho optimálnímu nastavení se proto využívá počítačových a matematických modelů.

Poté vstupuje předlitek do oblasti sekundárního chlazení, kde je ostřikován vodou. Předlitek, jenž má ještě tekuté jádro, je zde veden vodíci a opěrnými válečky. Odvod tepla v této oblasti má vliv zejména na povrchovou a podpovrchovou kvalitu předlitku. Sekundární chlazení je rovněž automatizováno.

Důležitým krokem výroby předlitku je jeho převedení z vertikální polohy do horizontální. Při něm je potřeba správného uspořádání segmentů válců, které tuto změnu umožňují. Jejich uložení je obzvláště citlivé v oblasti výstupu oceli z krystalizátoru. Po narovnání putuje proud k dělicímu zařízení, kde je palivovým hořákem dělen na jednotlivé požadované délky, ne však větší než 18 m. Následně je předlitek válečkovým dopravníkem dopraven v teplém stavu ke krokové přehřívací a vyrovnávací peci, popřípadě do skladu brám, kde je uchován pro pozdější využití.

Na bramovém zařízení plynulého odlévání je možné odlévat plynule lité předlitky ploché šířky 740 až 1575 mm při tloušťce 150 mm. Hmotnost předlitků se pohybuje v rozmezí 5,1 – 33 t podle rozměrů brám. [1]

Závislost hmotnosti na šířce a délce brám znázorněna níže (Graf 2.1). V praxi se nejčastěji používají bramy o šířkách 1 000 mm, 1 250 mm a 1 500 mm a délkách 12 m, 15 m a 18 m. Na tyto rozměry bude zaměřen výpočet optimální doby ohřevu brám.



Graf 2.1 Závislost hmotnosti na šířce bramy o délkách 6 m, 12 m a 18 m [1]

2.3. Válcovárenský komplex – trat' Steckel P-1500 [1, 4, 5]

Válcovací trat' Steckel P-1500 byla uvedena do provozu v druhé polovině roku 1999. Spojením s bramovým kontilitím a svými technickými možnostmi se stala unikátem ve výrobě válcovaných pásů za tepla. Obdobná koncepce nebyla do té doby

v provozních podmínkách realizována. Její výhodou je především úspora energií a výrazné zvýšení produkce výrobků oproti jiným výrobním provozům.

2.3.1. Výrobní program válcovací tratě

Válcovací trať slouží k výrobě pásů a plechů válcovaných za tepla. Plech válcovaný za tepla je výrobek dodávaný v tabulích čtvercového nebo obdélníkového tvaru s šířkou větší nebo rovnou 600 mm; ale také v jiném tvaru, například kruhovém nebo podle výkresu (dle požadavku zákazníka).

Pásky dále dělíme na:

- a) *Pás široký válcovaný za tepla* (s šířkou větší nebo rovnou 600 mm). Po válcování se namotávají do svitků a jsou následně exportovány.
- b) *Pás široký válcovaný za tepla podélně dělený* (s válcovanou šířkou větší nebo rovnou 600 mm a s šířkou po podélném dělení menší než 600 mm). Slouží dále k výrobě ocelových profilů nebo například k výrobě silničních svodidel.

Dle tloušťky pásy a plechy rozdělujeme na:

- a) tenké (s tloušťkou menší než 3 mm)
- b) tlusté (s tloušťkou větší nebo rovnou 3 mm)

Vyráběné rozměry:

- a) tloušťky: 1,5 – 15 mm
- b) šířky: 600 – 1 550 mm

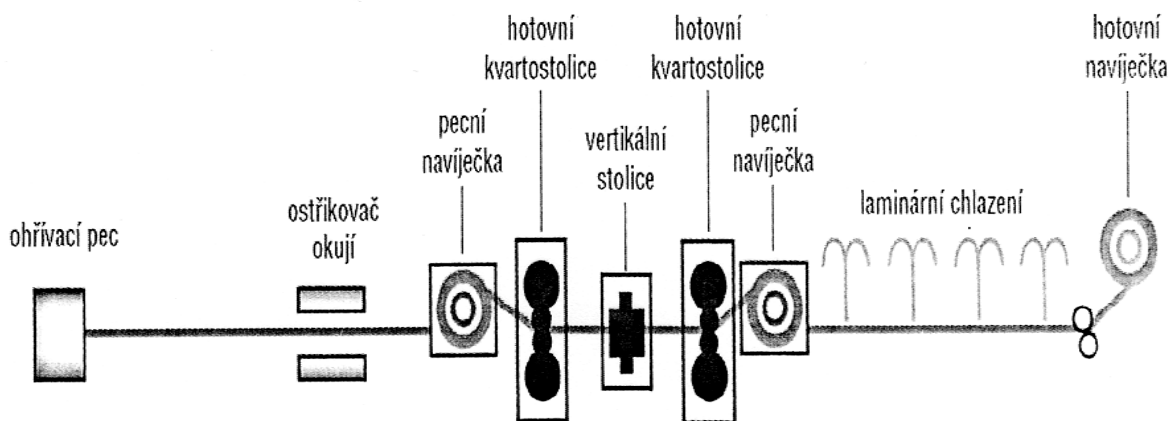
Vstupním materiálem jsou bramy o tloušťce 150 mm, šířce 740 – 1550 mm a maximální délce 18 200 mm. Brama se ohřívá na požadovanou teplotu (1 230 – 1 290 °C) a poté je přivedena přiváděcím valníkem k ostříku okují, kde dochází k odstranění okují. Následně ohřátá brama vstupuje do válcovacího úseku trati. Zde probíhá úběr materiálu na požadovanou tloušťku. Poté následuje chlazení a navíjení případně dělení konečného výrobku.

2.3.2. Zařízení tratě P-1500

Válcovna pásů Steckel se skládá ze tří hlavních úseků:

- Pecní úsek
- Válcovací úsek
- Úsek laminárního chlazení a navíječky

Pecní úsek tvoří kroková ohřívací pec a úsek za pecí. Válcovací úsek je složen ze dvou horizontálních válcovacích stolic, vertikální stolice, vstupních a výstupních podávacích válců, dvou pecních navíječek, vstupních a výstupních pravítek, unášeče, nůžek a výběhového úseku. Dále je oblast laminárního chlazení a na konci hotovní navíječka (Obr. 2.4).



Obr. 2.4 Schéma zařízení Steckelovi trati [5]

2.3.3. Pecní úsek

Kroková pec

Kroková pec s čelním vstupem a výstupem je energetické zařízení sloužící k ohřevu bramy na válcovací teplotu v řízené atmosféře. Tento ohřev je řízen počítačem, aby bylo dosaženo rovnoměrného rozložení teploty bramy při minimální spotřebě energie. Bramy jsou do pece dopravovány za vysokých vstupních teplot (800 – 1 000 °C), ale je i možno vsázet bramy chladné ze skladu, které mají okolní teplotu. Maximální teplota v peci může dosáhnout až 1 350 °C. Ohřev materiálu se provádí do teploty 1 290 °C. Efektivní délka i šířka pece je 19 m (Příloha 4, Výkres 1).

Brama je do pece vložena sázcím strojem. Posuv bram v peci je zajištěn pomocí krokovacího zařízení. Tento systém má čtyři cykly: nahoru, dopředu, dolů a dozadu. Vytahovací zařízení nacházející se na výpadové straně zvedne bramu z pohyblivých kluznic a položí ji na odváděcí valník. Konstrukce vytahovacího zařízení je stejná, jako vsázcího. Pec je z obou stran opatřena dveřmi, které se mohou ovládat každé zvlášť.

Spalovací zařízení tvoří 4 topné zóny:

- Horní přehřívací
- Horní ohřívací
- Horní prohřívací
- Spodní prohřívací

Horní přehřívací zóna má délku 5 m. V jejím stropu jsou umístěny dvě řady po devíti hořácích typu BFP.G8. Jejich instalovaný výkon je 18,726 MW. Zóna má označení č.1.

Zóna ohřevu je 4 m dlouhá. Řešení hořáků je stejně jako u předešlé zóny, je zde však jiný typ hořáku – BFP.G6 o instalovaném výkonu 14 MW. Jedná se o zónu č.2.

Prostor prohřevu je rozdělen nejen na horní a spodní část, ale i na pravou a levou. Horní zóny mají celkovou délku 6,6 m, spodní 12 m. Horní prohřívací zóny vyhřívají dvě řady po desíti kusech hořáků typu BFP.G6 o celkovém instalovaném výkonu 9,618 MW, ve spodní části se pak nachází 16 hořáků typu BLF.G4 o celkovém instalovaném výkonu 33,746 MW. Jejich poloha je přední. Označení: levá horní – č.3, levá dolní – č.4, pravá horní – č.5, pravá spodní – č.6.

Kromě výše uvedených zón je na začátku pece rekuperační zóna sloužící k využití tepla ve spalínách k částečnému ohřevu bramy na teplotu cca 1 000 °C. Schematické rozdělení jednotlivých oblastí je uvedeno níže (Příloha 2). Číselné označení topných zón mimo jiné označuje 6 tepelně řízených zón, které řídí obsluha zařízení (Příloha 1).

Všechny hořáky jsou napájeny zemním plynem o spodní výhřevnosti 35,485 MJ/Nm³ a teplotě 20 °C a horkým spalovacím vzduchem o teplotě cca 560 °C.

Úsek za pecí

Po vytažení bramy z pece je vedena po valníku k válcovací trati. Před válcováním se v odkujovacím boxu pomocí vysokotlaké vody o tlaku 165 bar odstraňují primární okuje z horní i spodní části bramy. Box tvoří dva kolektory, v nichž je vsazeno 32 trysek.

2.3.4. Válcovací úsek

Válcovací úsek je část trati, která zajišťuje vyválnování teplé bramy na pás požadovaných parametrů při dodržení technologických podmínek. Typ tratě je reverzní dvoustolicová trať Steckel (Příloha 4).

Válcovací proces má dvě etapy. V první se provádějí úběry bez použití pecních navíječek. Zpravidla jsou provedeny 2 úběry na každé kvatrostolici. Tímto se zmenší tloušťka provalku na cca 25 mm. Okamžitě po čtvrtém úběru je provalek veden do první pecní navíječky. Tím začíná druhá etapa, která probíhá postupným navíjením pásu na jednotlivé pecní navíječky. V této fázi je úběrů nejčastěji šest. Po posledním úběru putuje pás výběhovým valníkem přes úsek laminárního chlazení k hotovní navíječce.

Horizontální válcovací stolice H1 a H2

Jedná se o dvě stejné reverzní kvatrostolice. Průměr pracovních válců je 840 mm, jejich délka těla pak 1 925 mm. Průměr opěrného válce je 1 730 mm a jeho délka 1 725 mm. Poháněny jsou pouze pracovní válce. Pohon je řešen kardanovými vřeteny. Všechny válce jsou chlazeny.

Vertikální stolice

Je vybavena kalibrovanými válci o průměru 1 195 – 1 240 mm. Jejich rozevření může být v rozmezí 600 – 1 725 mm. Válcovací síla zde dosahuje kolem 225 t. Slouží k eliminaci rozšíření konců pásů.

Vstupní a výstupní hydraulicky ovládaná pravítka

Nachází se před první a za druhou kvatrostolicí. Jsou na sobě mechanicky nezávislé.

Vstupní a výstupní podávací válce

Jsou umístěny na vstupu a výstupu každé kvartstolice.

Unášeče a nůžky

Toto kombinované zařízení se skládá z unášecích válců a nůžek umístěných na společném rámu. Je umístěno na výstupní straně pecních navíječek. Pořadí je válec – nůžky ve směru od navíječky k válcovému tandemu.

Pecní navíječky

Nacházejí se na obou stranách válcovacího tandemu. Jsou vybaveny čtyřmi plynovými hořáky, které vytápí buben navíječky na cca 1 100°C. Slouží k ustálení teplot chladnouceho pásu a zamezení vzniku okují.

Výběhový úsek

Tvoří ho výběhový válečkový dopravník, který má za úkol dopravit vyválcovaný pás do oblasti laminárního chlazení.

2.3.5. Úsek laminárního chlazení a navíječka svitků

Aby bylo možno finálně navinout pás do svitku, musí se dosáhnout požadované navíjecí teploty. K tomu slouží oblast laminárního chlazení. Skládá se ze sedmi chladících úseků, z nichž každý je složen ze sedmi horních a šestnácti spodních kolektorů. Kolektory obsahují plnoprůtokové trysky vodního chlazení. Doválcovací teplota se pohybuje kolem 860°C, navíjecí teplota 620°C. Navíječka se skládá ze tří přítlačných, hydraulicky regulovaných válců. Svitky se po navinutí a stažení z bubnu přesunou na krokový dopravník, jenž je přesunou na venkovní sklad.

2.4.Materiál [1, 5]

Převážný sortiment výrobků je jakostí běžných konstrukčních ocelí, jako jsou nízkouhlíkaté, uhlíkaté, oceli s vyšší pevností a oceli vhodné pro tváření za studena. Dále se vyrábí jakosti mikrolegovaných ocelí a malé procento zaujímají trafooceli.

Skupina jakostí	Podíl
Běžné	cca 80%
Mikrolegované	cca 10%
Výšepevné	cca 5%
Trafo	cca 3 – 5%

Tabulka 2.1 Rozdělení výroby jakostí ocelí na Minihuti

Výroba se řídí potřebami zákazníka, který si může určit fyzikální a materiálové vlastnosti požadovaného výrobku. Typ oceli hraje významnou roli ve stanovení délky ohřevu předlitků. V závislosti na chemickém složení je rozdílná měrná tepelná kapacita u jednotlivých typů ocelí.

2.4.1. Základní nabídka

Základní nabídku tvoří jakosti běžných konstrukčních ocelí, ocelí s vyšší pevností a ocelí pro tváření za studena (Tabulka 2.2).

Oceli pro tváření za studena			
Norma	EN 10111	ČSN	Použití
Oceli pro tváření za studena	DD11	11 321	Konstrukční ocel vhodná pro tváření za studena
	DD12	11 325	Konstrukční ocel vhodná pro tváření za studena
	DD11	11 331	Konstrukční ocel vhodná pro tváření za studena
Konstrukční oceli pro zvlášť hluboké tváření za studena	DD13	11 305	Ocel vhodná k zvlášť hlubokému tažení za studena
	DD14		Ocel vhodná k zvlášť hlubokému tažení za studena
Konstrukční oceli			
Norma	EN 10025-2	ČSN	Použití
Konstrukční oceli		11 343	Konstrukční ocel vhodná pro lisování a výrobu svařovaných součástí
	S235JR	11 375	Součásti konstrukcí a strojů středních tloušťek tavně svařovaných pro výrobu tlakových nádob s omezeným tlakem a teplotou do 300°C
	S235J0 S235J2	11 378	Jemnozrnná konstrukční ocel vhodná pro tváření za studena
Konstrukční oceli s vyšší pevností		11 425	
		11 428	
Konstrukční oceli s vyšší pevností	S275JR	11 443	Součásti konstrukcí menších tloušťek, svařované strojní součástky
	S275J0 S275J2	11 448	Svařované dynamicky namáhané konstrukce pracující za snížených i zvýšených teplot
	S355JR S355J0 S355J2	11 523	Jemnozrnná konstrukční ocel vhodná pro tváření za studena

Tabulka 2.2 Základní nabídka jakostí

2.4.2. Rozšířená nabídka

Do rozšířené nabídky patří konstrukční oceli pro speciální účely, mikrolegované oceli, trafooceli, oceli vhodné ke svařování a další (Tabulka 2.3, 2.4 a 2.5).

Konstrukční oceli uhlíkaté			
Norma	EN 10025-2	ČSN	Použití
Konstrukční uhlíkaté oceli	E 295	11 500	Strojní součásti namáhané staticky i dynamicky, u nichž není vyžadována svařitelnost
	E 335	11 600	Neušlechtilá konstrukční ocel na strojní součásti k tvarování ohybem, u nichž není vyžadována svařitelnost
	E 360	11 700	Neušlechtilá konstrukční

Konstrukční oceli uhlíkaté			
Norma	EN 10083-2	ČSN	Použití
Konstrukční uhlíkaté oceli	C22E C22R	12 022	
	C35 C35E C35R	12 040	
Konstrukční uhlíkaté oceli	C40 C40E C40R	12 041	Vhodná pro různé součásti, pružiny
	C45 C45E C45R	12 050	Vhodná k výrobě pružin a řetězů
	C50E C50R	12 051	Ocel k zušlechťování
	C55 C55E C55R	12 060	Vhodná k výrobě pružin a řetězů
	C60 C60E C60R	12 061	Ocel k zušlechťování
	C67S	12 071	Vhodná k výrobě pružin a řetězů.

Tabulka 2.3 Rozšířená nabídka konstrukčních ocelí

Oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi		
Norma	ČSN, KN	ČSN EN 10025-5
Oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi	15 117	S235J0W S235J2W
	15 217	S355J0W S355J0WP S355J2WP

Tabulka 2.4 Jakosti ocelí se zvýšenou odolností proti korozi

Mikrolegované jakosti		
Norma	SEW 093	
Mikrolegované oceli k válcování za studena	ZStE 260	
	ZStE 300	
	ZStE 340	
	ZStE 380	
	ZStE 420	
Norma	SEW 092	EN 10149-2
Mikrolegované oceli k tváření za studena		S 315 MC
	QStE 340 TM	
		S 350 MC
	QStE 380 TM	
	QStE 420 TM	S 420 MC
	QStE 460 TM	S 460 MC
	QStE 500 TM	S 500 MC
	QStE 550 TM	S 550 MC

Mikrolegované jakosti		
Norma	EN 10 208-2	DIN 17172
Mikrolegované oceli pro výrobu spirálově svařovaných trubek	L 290 MB	StE 290.7 TM
	L 360 MB	StE 360.7 TM
	L 415 MB	StE 415.7 TM
	L 450 MB	StE 445.7 TM
	L 485 MB	StE 480.7 TM
		StE 320.7 TM
		StE 385.7 TM

Tabulka 2.5 Jakosti mikrolegovaných ocelí

3. Tepelná bilance krokové pece

Tepelnou bilancí pece se rozumí všechny toky energie daného zařízení. Celkovou bilanci pak lze vyjádřit:

$$P = \dot{Q}_{chl} + \dot{Q}_{sal} + \dot{Q}_{sp} + \dot{Q}_{ohř} \quad (3.1)$$

kde P je výkon hořáků, \dot{Q}_{chl} tepelný výkon odvedený chlazením pece, \dot{Q}_{sal} tepelný výkon přestupující do okolí pece, \dot{Q}_{sp} tepelný výkon odvedený ve spalínách (komínová ztráta) a $\dot{Q}_{ohř}$ tepelný výkon potřebný k ohřátí daného materiálu. Poslední uvedený nelze z dostupných informací přesně určit, protože jsou měnící se v závislosti na výkonu hořáků a vlastnostech vsazených brám.

Instalovaný výkon hořáků činí 76 091 kW. Tento výkon se snižuje v závislosti s průtokem plynu a vzduchu. Konečný výkon určuje obsluha pece. Následující výpočty budou pro instalovaný výkon.

3.1. Ztráty chlazením

Pro výpočet tepla odvedeného chlazením je nutno znát fyzikální vlastnosti chladicího média (vody), jeho vstupní a výstupní teplotu z pece a průtok.

Vlastnosti	Hodnota
Hustota	998 kg.m ⁻³
měrná tepelná kapacita	4 182 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
Průtok	440 m ³ .h ⁻¹
teplota na vstupu	34,4 °C
teplota na výstupu	46,4 °C

Tabulka 3.1 Vlastnosti chladicí vody

$$\dot{Q}_{chl} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) \quad (3.2)$$

Po dosazení dostaneme:

$$\dot{Q}_{chl} = \frac{440}{3600} \cdot 998 \cdot 4182 \cdot (46,4 - 34,4) = 6121,3 \text{ kW}$$

Ztráty chlazením stanovíme jako:

$$\xi_{chl} = \frac{\dot{Q}_{chl}}{P} \quad (3.3)$$

$$\xi_{chl} = \frac{6121,3}{76091} \cdot 100 = 8,04 \%$$

3.2. Ztráty sáláním do okolí [7, 8, 9, 10, 11, 13]

K zjištění ztrát sáláním pece do okolí je nutno rozdělit pec na 3 části (Příloha 3):

- Rekuperace
- Předehřev a 1. část ohřevu
- 2. část ohřevu a vyrovnávání

Teplo předané stěnám vyzdívky je složeno ze dvou složek – konvekce a záření.

3.2.1. Rekuperace

Protože se v rekuperační části nenacházejí žádné hořáky, je složka záření tvořena zářením spalin. Pro výpočet hustoty tepelného toku předávaného spalinami stěně, která je obklopuje, se používá vztah:

$$q_{p,s} = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_p \cdot T_p^4 - A_p \cdot T_s^4) \quad (3.4)$$

Emisní součinitel plynu obsahující CO₂ a H₂O se počítá z rovnice:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{co_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} - \Delta\varepsilon \quad (3.5)$$

Součinitelé CO₂ a H₂O se po součinu příslušného parciálního tlaku a účinné tloušťky vrstvy odečítají z grafů pro střední teplotu plynu (Příloha 5). Účinná tloušťka vrstvy se počítá z poměru objemu, ve kterém je plyn uzavřen a povrchu stěn obklopující tento objem. Platí pak:

$$l > 1 \text{ m} \rightarrow l = 3,6 \cdot \frac{V}{S} \quad (3.6)$$

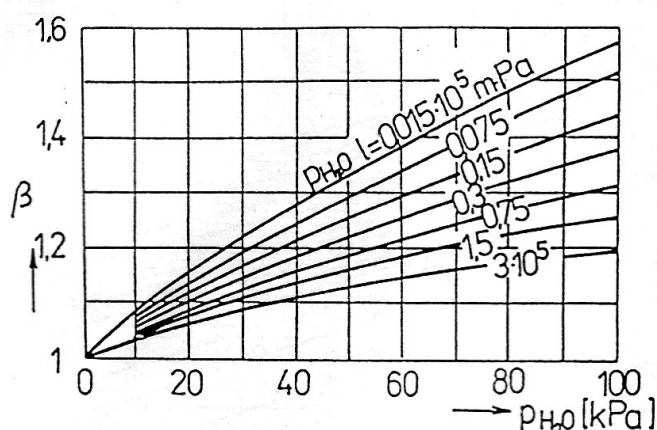
$$l < 1 \text{ m} \rightarrow l = 3,4 \cdot \frac{V}{S} \quad (3.7)$$

Opravu vzájemného překrytí spekter oxidu uhličitého a vodní páry $\Delta\varepsilon$ lze zanedbat. Korekční součinitel β se odečítá z grafu 3.1.

Absorbivita se počítá ze vztahu:

$$A_p = \varepsilon_{CO_2} \cdot \left(\frac{T_p}{T_s} \right)^{0,65} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} \cdot \left(\frac{T_p}{T_s} \right)^n \quad (3.8)$$

Obecně se hodnoty odečítají ze stejných grafů, tentokrát pro teplotu stěny. V tomto případě lze součinitele použít stejné, jako pro teplotu spalin. Mocnitél n se volí podle teploty stěny. Pro $t_s > 900^\circ\text{C}$ je $n = 0,4$.



Graf 3.1 Závislost korekčního součinitele β na parciálním tlaku [7]

Pro stanovení parciálního tlaku je nutno provést výpočty množství jednotlivých složek ve spalinách. K tomu použijeme rovnice statiky spalování plyných paliv.

Teoretické množství spalovacího vzduchu počítáme ze vztah:

$$V_{vz,t}^s = 4,76 \cdot \left[\left(x + \frac{y}{4} \right) \cdot C_x H_y \right] \quad [\text{m}^3_{vz} \cdot \text{m}^{-3}_n] \quad (3.9)$$

Množství spalin je pak součet:

$$V_{sp,t}^s = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \quad [\text{m}^3_{sp} \cdot \text{m}^{-3}_n] \quad (3.10)$$

kde jednotlivé složky spočteme z rovnic:

$$V_{CO_2} = x \cdot C_x H_y + CO_2 \quad [\text{m}^3_{CO_2} \cdot \text{m}^{-3}_n] \quad (3.11)$$

$$V_{H_2O} = \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + (n-1) \cdot V_{vz,t}^s \quad [\text{m}^3_{H_2O} \cdot \text{m}^{-3}_n] \quad (3.12)$$

$$V_{N_2} = N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s \quad [\text{m}^3_{N_2} \cdot \text{m}^{-3}_n] \quad (3.13)$$

Jednotlivé koncentrace pak:

$$\omega_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{(n-1) \cdot V_{vz,t}^s + V_{sp,t}^s} \cdot 100 \quad (3.14)$$

$$\omega_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{(n-1) \cdot V_{vz,t}^s + V_{sp,t}^s} \cdot 100 \quad (3.15)$$

Parciální tlaky pak odpovídají:

$$p_{CO_2} = \omega_{CO_2} \cdot 1\,000 \quad (3.16)$$

$$p_{H_2O} = \omega_{H_2O} \cdot 1\,000 \quad (3.17)$$

Pro určení součinitele přestupu tepla zářením pak platí vztah:

$$\alpha_{1,sp} = \frac{q_{p,s}}{t_p - t_s} \quad (3.18)$$

Teplota spalin v rekuperaci je 1 000 °C, teplota stěny okolo 995 °C. Emisivita stěny je pak 0,75. Přebytek vzduchu činí 1,05.

Složení paliva	Měrný objem [m ³ .m ⁻³ _n]	Výhřevnost [MJ. m ⁻³ _n]
CH ₄	0,976	35,80
C ₂ H ₆	0,002	64,35
C ₃ H ₈	0,001	93,57
C ₄ H ₁₀	0,012	123,36
N ₂	0,009	-
CO ₂	0,002	-

Tabulka 3.2 Složení směšného plynu

Po dosazení uvedených hodnot do rovnic 3.4 – 3.13 vychází následující výsledky:

Veličiny	Výsledky
$V_{vz,t}^s$	9,72 m ³ .m ⁻³ _n
V_{H_2O}	2,02 m ³ .m ⁻³ _n
V_{CO_2}	1,03 m ³ .m ⁻³ _n
V_{N_2}	7,69 m ³ .m ⁻³ _n
$V_{sp,t}^s$	10,74 m ³ .m ⁻³ _n
ω_{CO_2}	9,2 %
ω_{H_2O}	18,01 %
p_{CO_2}	9 200 Pa
p_{H_2O}	18 007 Pa

Tabulka 3.3 Výsledky výpočtu spalin

Veličiny	Výsledky
l	2,72 m
$p_{CO_2} \cdot l$	25 015,5 Pa.m
$p_{H_2O} \cdot l$	48 965,48 Pa.m
ϵ_{CO_2}	0,135
ϵ_{H_2O}	0,25
β	1,09
ϵ_p	0,41
A_p	0,41
$q_{p,s}$	625,78 W.m ⁻²
$\alpha_{1,sp}$	125,16 W.m ⁻² .K ⁻¹

Tabulka 3.4 Výsledky záření

Výsledky z tabulky 3.3 platí pro všechny části pece. Hodnoty z tabulky 3.4 se budou měnit v závislosti na rozměrech a teplotě spalin.

Pro výpočet konvekční složky je nutno si představit každou část pece jako kanál, ve kterém proudí tekutina. Platí zde tedy vztahy pro vynucenou konvekci v trubkách a kanálech. Součinitel přestupu tepla se určí jako:

$$\alpha_{1,k} = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (3.19)$$

kde charakteristický rozměr L je nahrazen hydraulickým průměrem:

$$d_h = \frac{4 \cdot S}{O} \quad (3.20)$$

Vztah pro výpočet Nusseltova kritéria je určen typem proudění, které je dáno Reynoldsovým číslem:

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu} \quad (3.21)$$

V případě této pece se nebude jednat o laminární proudění. Proto rovnice pro výpočet Nusseltova čísla bude pro $Re < 10^4$:

$$Nu = K_o \cdot Pr^{0,43} \quad (3.22)$$

a pro $Re > 10^4$:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \epsilon_L \quad (3.23)$$

kde K_o volíme z tabulky 3.5 a ϵ_L z tabulky 3.6.

Re.10 ⁻³	2,3	2,5	3,0	3,5	4	5	6	7	8	9	10
K _o	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Tabulka 3.5 Hodnoty K_o v závislosti na Re [9]

ℓ / d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
Re=2.10 ⁴	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1,00
Re=5.10 ⁴	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1,00
Re=1.10 ⁵	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1,00
Re=1.10 ⁶	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1,00

Tabulka 3.6 Hodnoty opravného součinitele ϵ_L [9]

Rychlost proudění w je určena jako poměr průtoku spalin a průřezu kanálu:

$$w = \frac{\dot{V}}{S} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d_h^2} \quad (3.24)$$

Po dosazení rozměrů rekuperační zóny do rovnice 3.20 vychází hydraulický průměr d_h 3,2 m. Průtok spalin \dot{V} v rekuperaci je $23,95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Následným dosazením do rovnice 3.24 vychází rychlost spalin $2,98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Veličiny	Hodnoty
w	$2,98 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_{1000}	$0,0001743 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
λ_{1000}	$0,109 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Pr_{1000}	0,58

Tabulka 3.7 Vlastnosti spalin v rekuperaci

Vypočtené hodnoty a hodnoty z tabulky 3.7 jsem dosadil do rovnice 3.21. Reynoldsovo číslo nabývá hodnoty 54 687, z čehož vyplývá, že Nusseltovo číslo se bude počítat z rovnice 3.23. Hodnota opravného součinitele ϵ_L je 1,25. Po dosazení je hodnota Nusseltova 128,15. Následným dosazením do rovnice 3.20 činí součinitel přestupu tepla $\alpha_{1,k}$ $4,37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Pro celkový součinitel přestupu tepla pak platí:

$$\alpha_1 = \alpha_{1,k} + \alpha_{1,sp} \quad (3.25)$$

Celkový součinitel přestupu tepla α_1 pak je $129,52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Pro součinitel přestupu tepla do okolí pece platí vztah:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda_{vz}}{L} \quad (3.26)$$

kde L je rozměr kratší strany plochy. Jelikož se jedná o volnou konvekci, Nusseltovo číslo se vypočítá z rovnice:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (3.27)$$

Konstanty c a n se určují na základě součinu $Gr \cdot Pr$. Pro $Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$ je $c = 0,135$ a $n = 1/3$.

$$Gr = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \gamma \cdot \Delta t \quad (3.28)$$

kde Δt je rozdíl teploty stěny a okolí a objemová tepelná roztažnost vztahem:

$$\gamma = \frac{1}{273,15 + t_{st}} \quad (3.29)$$

kde t_{st} je střední teplota mezi stěnou a okolím. Tato teplota je tzv. určovací.

Nusseltovo číslo se u stropu zvyšuje o 30 %, u dna pece o 30 % snižuje.

Po dosazení hodnot z tabulky 3.8 do rovnic 3.26 – 3.29 nabývají hodnoty přestupů tepla (Tabulka 3.9).

Veličiny	Strop	Boční stěny	Dno
t_o	40 °C	40 °C	40 °C
t_s	120 °C	140 °C	170 °C
t_{st}	80 °C	90 °C	105 °C
v_{vz}	0,00002109 m ² .s ⁻¹	0,00002211 m ² .s ⁻¹	0,00002487 m ² .s ⁻¹
λ_{vz}	0,0305 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,0313 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,0331 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Pr_{vz}	0,692	0,690	0,688

Tabulka 3.8 Vlastnosti vzduchu v okolí rekuperace

Veličina	Strop	Boční stěny	Dno
α_2	8,09 W.m ⁻² .K ⁻¹	6,60 W.m ⁻² .K ⁻¹	4,86 W.m ⁻² .K ⁻¹

Tabulka 3.9 Hodnoty součinitelů přestupu tepla v okolí rekuperace

Pro teplo sdělené rovinnou stěnou platí rovnice:

$$q = k \cdot (t_{sp} - t_o) \quad (3.30)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (3.31)$$

Teplota libovolné stěny se počítá ze vztahu:

$$t_{sx} = t_{sp} - q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{x-1} \frac{l_i}{\lambda_i} \right) \quad (3.32)$$

Tepelný výkon získáme jako:

$$\dot{Q} = q \cdot S \quad (3.33)$$

kde S je plocha stěny.

Dosazením předem vypočítaných hodnot a hodnot z tabulky 3.10 do rovnic 3.30 – 3.33 jsem získal hodnoty tepelných toků v rekuperaci (Tabulka 3.11).

Oblast	Strop		Boční stěny		Dno	
Stěna	l_i [mm]	λ_i [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	l_i [mm]	λ_i [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	l_i [mm]	λ_i [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
i = 1	200	0,166	200	0,166	50	1,790
2	13	0,076	13	0,076	115	1,396
3					65	0,485
4					130	0,291
5					50	0,088

Tabulka 3.10 Rozměry a tepelné vodivosti stěn vyzdívky rekuperace [14]

Veličina	Strop	Boční stěny	Dno
q [W.m ⁻²]	637,5	625,9	652,7
\dot{Q} [kW]	101,7	19,9	104,1

Tabulka 3.11 Hodnoty tepelných toků a tepelných ztrát v rekuperaci

3.2.2. Přehřev a 1.část ohřevu

V této oblasti platí stejné vztahy, jako v oblasti rekuperace. Složka záření je navíc rozšířena o záření plamenu hořáku. Neprojevuje se však ve spodní části, kde je odstíněna vsazeným materiálem.

$$q_{pl} = \varepsilon_{pl} \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_{pl}^4 - T_s^4) \quad (3.34)$$

kde ε_{pl} je 0,3 a teplota plamene 1400 °C.

Součinitel přestupu tepla pro záření plamene se následně určí z rovnice:

$$\alpha_{1,pl} = \frac{q_{pl}}{t_{pl} - t_s} \quad (3.35)$$

Celkový součinitel přestupu tepla pak je součtem složek:

$$\alpha_1 = \alpha_{1,k} + \alpha_{1,sp} + \alpha_{1,pl} \quad (3.36)$$

Toto platí pro boční stěny a strop. Pro spodní část se součinitel přestupu tepla počítá ze vztahu 3.25.

Po dosazení rozměrů zóny do rovnice 3.20 vychází hydraulický průměr d_h 3,93 m. Průtok spalin \dot{V} v této zóně je 23,95 m³.s⁻¹. Následným dosazením do rovnice 3.24 vychází rychlost spalin 1,97 m.s⁻¹. Teplota spalin je 1 300 °C, teplota stěny okolo 1297 °C. Emisivita stěny je pak 0,6. Dosazením do rovnic 3.34 a 3.35 pak vychází součinitel přestupu tepla plamene $\alpha_{1,pl}$ 174,27 W.m⁻².K⁻¹. Součinitel přestupu tepla zářením spalin se pak počítá stejnými rovnicemi, jako v rekuperační oblasti.

Veličiny	Výsledky
l	3,34 m
$p_{CO_2} \cdot l$	30 757,37 Pa.m
$p_{H_2O} \cdot l$	60 204,66 Pa.m
ε_{CO_2}	0,12
ε_{H_2O}	0,25
β	1,09
ε_p	0,39
A_p	0,39
$q_{p,s}$	548,2 W.m ⁻²
$\alpha_{1,sp}$	182,73 W.m ⁻² .K ⁻¹

Tabulka 3.12 Výsledky záření

Složka konvekce se počítá obdobně, jako v rekuperaci.

Veličiny	Hodnoty
w	1,97 m.s ⁻¹
v ₁₃₀₀	0,000246 m ² .s ⁻¹
λ ₁₃₀₀	0,1351 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Pr ₁₃₀₀	0,55

Tabulka 3.13 Vlastnosti spalín

Vypočtené hodnoty a hodnoty z tabulky 3.13 jsem dosadil do rovnice 3.21. Reynoldsovo číslo nabývá hodnoty 31 514, z čehož vyplývá, že Nusseltovo číslo se bude počítat z rovnice 3.23. Hodnota opravného součinitele ε_L je 1,47. Po dosazení je hodnota Nusseltova 94,78. Následným dosazením do rovnice 3.20 činí součinitel přestupu tepla $\alpha_{1,k}$ 3,26 W.m⁻².K⁻¹.

Po dosazení do rovnice 3.36 jsou pak součinitelé přestupů tepla:

Veličina	Strop a Boční stěny	Dno
α_1	360,26 W.m ⁻² .K ⁻¹	186 W.m ⁻² .K ⁻¹

Tabulka 3.14 Hodnoty součinitelů přestupu tepla

Pro výpočet součinitele přestupu tepla do okolí pece platí stejné vztahy, jako v rekuperaci (rovnice 3.26 až 3.29).

Veličiny	Strop	Boční stěny	Dno
t _o	40 °C	40 °C	40 °C
t _s	180 °C	150 °C	150 °C
t _{st}	110 °C	95 °C	95 °C
v _{vz}	0,00002429 m ² .s ⁻¹	0,00002262 m ² .s ⁻¹	0,00002262 m ² .s ⁻¹
λ _{vz}	0,0328 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,0317 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	0,0317 W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Pr _{vz}	0,687	0,689	0,689

Tabulka 3.15 Vlastnosti vzduchu v okolí přehřevu a 1. části ohřevu

Po dosazení hodnot z tabulky 3.15 do rovnic 3.26 – 3.29 nabývají hodnoty přestupů tepla:

Veličina	Strop	Boční stěny	Dno
α_2	9,27 W.m ⁻² .K ⁻¹	6,84 W.m ⁻² .K ⁻¹	4,73 W.m ⁻² .K ⁻¹

Tabulka 3.16 Hodnoty součinitelů přestupu tepla v okolí přehřevu a 1. části ohřevu

Výpočet tepelných toků je rovněž stejný, jako v předešlé zóně. Stěny však jsou složeny z jiných materiálů (Tabulka 3.17). Konečné výsledky jsou pak uvedeny v tabulce 3.18.

Oblast	Strop		Boční stěny		Dno	
Stěna	l_i [mm]	λ_i [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	l_i [mm]	λ_i [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	l_i [mm]	λ_i [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
i = 1	200	1,022	200	1,039	50	1,790
2	35	0,202	115	0,456	115	1,396
3	50	0,099	80	0,151	65	0,485
4			50	0,088	130	0,291
5					50	0,088

Tabulka 3.17 Rozměry a tepelné vodivosti stěn vyzdívky [14]

Veličina	Strop	Boční stěny	Dno
q [W.m ⁻²]	1279,1	746,1	909,0
\dot{Q} [kW]	103,8	14,9	73,8

Tabulka 3.18 Hodnoty tepelných toků a tepelných ztrát

3.2.3. 2.část ohřevu a vyrovnávání

Oproti předchozí zóně jsou hořáky umístěny i ve spodní části. Proto je celková složka přestupu zářením složena ze záření spalin a záření plamene a platí pro všechny stěny.

Po dosazení rozměrů zóny do rovnice 3.20 vychází hydraulický průměr d_h 6,18 m. Průtok spalin \dot{V} v této zóně je 11,45 m³.s⁻¹. Následným dosazením do rovnice 3.24 vychází rychlost spalin 0,38 m.s⁻¹. Teplota spalin je 1 300 °C, teplota stěny okolo 1297 °C. Emisivita stěny je pak 0,6. Dosazením do rovnic 3.34 a 3.35 pak vychází součinitel přestupu tepla plamene $\alpha_{1,pl}$ 174,27 W.m⁻².K⁻¹. Součinitel přestupu tepla zářením spalin se pak počítá stejnými rovnicemi, jako v předchozích dvou oblastech.

Veličiny	Výsledky
l	4,2 m
$p_{CO_2} \cdot l$	38 608,57 Pa.m
$p_{H_2O} \cdot l$	75 572,64 Pa.m
ϵ_{CO_2}	0,13
ϵ_{H_2O}	0,255
β	1,1
ϵ_p	0,41
A_p	0,41
$q_{p,s}$	572,9 W.m ⁻²
$\alpha_{1,sp}$	190,97 W.m ⁻² .K ⁻¹

Tabulka 3.19 Výsledky záření

Složka konvekce se počítá obdobně, jako v předešlých dvou zónách.

Veličiny	Hodnoty
W	$0,38 \text{ m.s}^{-1}$
v_{1300}	$0,000246 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
λ_{1300}	$0,1351 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Pr_{1300}	$0,55$

Tabulka 3.20 Vlastnosti spalín

Reynoldsovo číslo nabývá hodnoty 9 585, z čehož vyplývá, že Nusseltovo číslo se bude počítat z rovnice 3.22. Hodnota opravného součinitele K_o je 33. Po dosazení je hodnota Nusseltova 38,28. Následným dosazením do rovnice 3.20 činí součinitel přestupu tepla $\alpha_{1,k}$ $0,84 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Po dosazení do rovnice 3.36 se pak součinitel přestupu tepla α_1 $350,29 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Pro výpočet součinitele přestupu tepla do okolí pece platí stejné vztahy, jako v předchozích dvou zónách (rovnice 3.26 až 3.29).

Veličiny	Strop	Boční stěny	Dno
t_o	$40 \text{ }^\circ\text{C}$	$40 \text{ }^\circ\text{C}$	$40 \text{ }^\circ\text{C}$
t_s	$180 \text{ }^\circ\text{C}$	$150 \text{ }^\circ\text{C}$	$180 \text{ }^\circ\text{C}$
t_{st}	$110 \text{ }^\circ\text{C}$	$95 \text{ }^\circ\text{C}$	$110 \text{ }^\circ\text{C}$
v_{vz}	$0,00002429 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	$0,00002262 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$	$0,00002429 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$
λ_{vz}	$0,0328 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$0,0317 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$0,0328 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
Pr_{vz}	$0,687$	$0,689$	$0,687$

Tabulka 3.21 Vlastnosti vzduchu v okolí 2. části ohřevu a vyrovnávání

Po dosazení hodnot z tabulky 3.21 do rovnic 3.26 – 3.29 nabývají hodnoty přestupů tepla:

Veličina	Strop	Boční stěny	Dno
α_2	$9,27 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$6,55 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$	$6,08 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Tabulka 3.22 Hodnoty součinitelů přestupu tepla v okolí 2. části ohřevu a vyrovnávání

Výpočet tepelných toků je rovněž stejný jako v předešlé zóně. Stěny jsou složeny ze stejných materiálů (Tabulka 3.17). Konečné výsledky jsou pak uvedeny v tabulce 3.23.

Veličina	Strop	Boční stěny	Dno
$q [\text{W.m}^{-2}]$	1279,1	743,3	884,5
$\dot{Q} [\text{kW}]$	167,5	94,0	141,2

Tabulka 3.23 Hodnoty tepelných toků a tepelných ztrát

Celkovou ztrátu sáláním do okolí pak můžeme procentuelně vyjádřit jako:

$$\xi_{sal} = \frac{\sum \dot{Q}}{P} \quad (3.37)$$

Po dosazení hodnot z tabulek 3.11, 3.17 a 3.23 vychází ztráta sáláním 1,08 %.

3.3.Ztráta ve spalinách [13]

Pro určení komínové ztráty je nejprve třeba určit měrné tepelné kapacity spalin a vzduchu a výhřevnost paliva. Pro výpočet ztrát platí vztah:

$$\xi_k = \frac{V_{sp,t}^S \cdot c_{p,sp} + (n-1) \cdot V_{vz,t}^S \cdot c_{p,vz}}{q_i} \cdot (t_{sp} - t_o) \cdot 100 \quad (3.38)$$

kde q_i je výhřevnost paliva a t_o je teplota okolí (pro Ostravu 8,6 °C).

Měrnou tepelnou kapacitu spalin lze určit ze vztahu:

$$c_{p,sp} = 1,34876 + 0,000205163 \cdot t_{sp} - 0,0000000252246 \cdot t_{sp}^2 \quad (3.39)$$

Měrnou tepelnou vzduchu ze vztahu:

$$c_{p,vz} = 1,2812971 + 0,0001145255 \cdot t_{sp} - 0,000000018 \cdot t_{sp}^2 \quad (3.40)$$

Teplota spalin vystupujících do okolí je 500 °C.

Výhřevnost paliva je dána součtem součinů obsahů složek paliva a jejich výhřevností:

$$q_i = \sum Q_i \cdot w_i \quad (3.41)$$

kde Q_i je výhřevnost složky a w_i zastoupení prvku v palivu (Tabulka 3.2).

Veličina	Hodnota
q_i	36 640 kJ.m _n ⁻³
$c_{p,vz}$	1,334 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹
$c_{p,sp}$	1,445 kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹

Tabulka 3.24 Hodnoty tepelných toků a tepelných ztrát

Po dosazení do rovnice 3.38 vychází komínová ztráta 21,7 %, což odpovídá 16 502 kW.

Celkové ztráty pece jsou pak součtem:

$$\xi = \xi_{chl} + \xi_{sal} + \xi_k \quad (3.42)$$

Po dosazení je celková ztráta 30,81 %, což je 23 444 kW.

Všechny výpočty jsou provedeny v příloze 6.

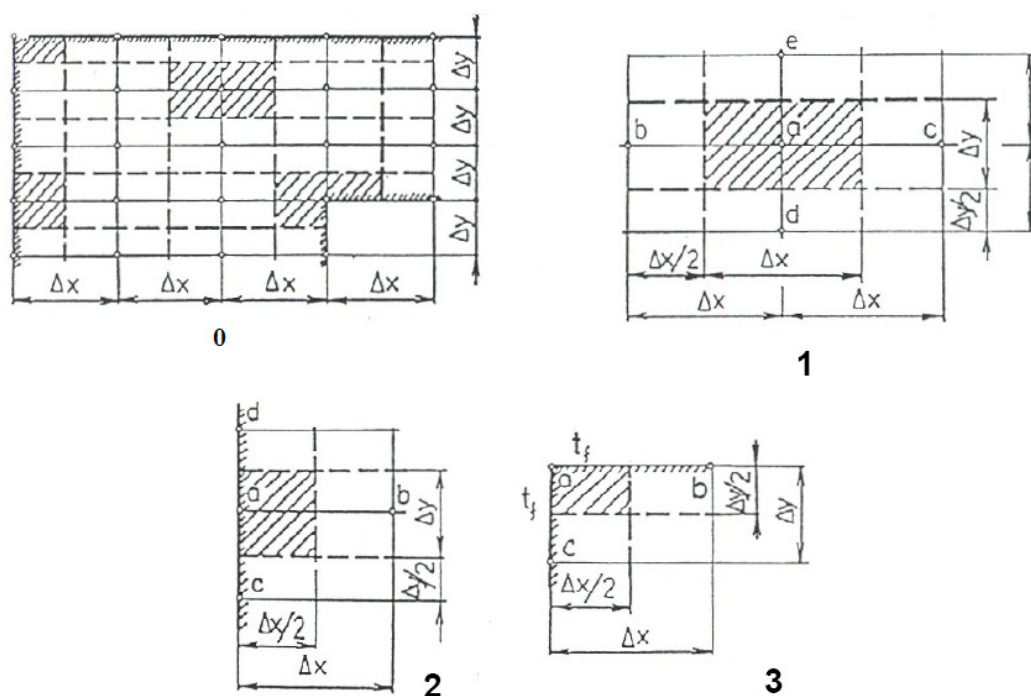
4. Výpočet ohřevu bramy v peci [7, 8, 10, 11]

Z hlediska ohřevu materiálu je možné rozdělit pec na stejné části, jako v případě výpočtu tepelné bilance. Teplo, kterým je brama ohřívána, je složeno z konvekční složky a radiační složky. Teplo sdílené zářením lze dále rozdělit na záření spalin a záření plamene hořáku. Aby byly výpočty přesnější, počítají se přestupy tepla zářením po každém časovém kroku. Teplota bramy se následně bere, jako průměr teplot elementů.

4.1. Ohřev v rekuperaci

Pokud je sázecí teplota 1000 °C a více, brama se v této části nezdržuje a krokovým systémem bývá přemístěna do předehřívací zóny.

Ohřev bramy se dá charakterizovat jako nestacionární vedení tepla. Pro přesnější výsledky je vhodné použít řešení dvourozměrné. Rovinu, ve které má být určeno teplotní pole jsem rozdělil pravoúhlou sítí na stejné čtverce (Obr. 4.1 – 0).



Obr. 4.1 Rozdělení bramy pravoúhlou čtvercovou sítí ($\Delta x = \Delta y$) [7]

Pro výpočet teploty ve vnitřním bodě (Obr. 4.1 - 1) platí vztah:

$$t'_a = t_a \cdot (1 - 4 \cdot Fo) + Fo \cdot (t_b + t_c + t_d + t_e) \quad (4.1)$$

Pro výpočet teploty v povrchovém bodě (Obr. 4.1 - 2):

$$t'_a = t_a \cdot (1 - 4 \cdot Fo - 2 \cdot Fo \cdot Bi) + Fo \cdot (2 \cdot t_b + t_c + t_d) + 2 \cdot Fo \cdot Bi \cdot t_o \quad (4.2)$$

Pro výpočet teploty v rohovém bodě (Obr. 4.1 - 3):

$$t'_a = t_a \cdot (1 - 2 \cdot (2 + Bi_1 + Bi_2)) + 2 \cdot Fo \cdot ((t_b + t_c) + t_o \cdot (Bi_1 + Bi_2)) \quad (4.3)$$

Fourierovo kritérium:

$$Fo = \frac{a \cdot \Delta \tau}{\Delta x^2} \quad (4.4)$$

kde $\Delta \tau$ je časový krok a součinitel teplotní vodivosti oceli a je:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (4.5)$$

kde c_p 750 J.kg⁻¹.K⁻¹, λ 28,5 W.m⁻¹.K⁻¹ a ρ 7860 kg.m⁻³.

Biotovo kritérium:

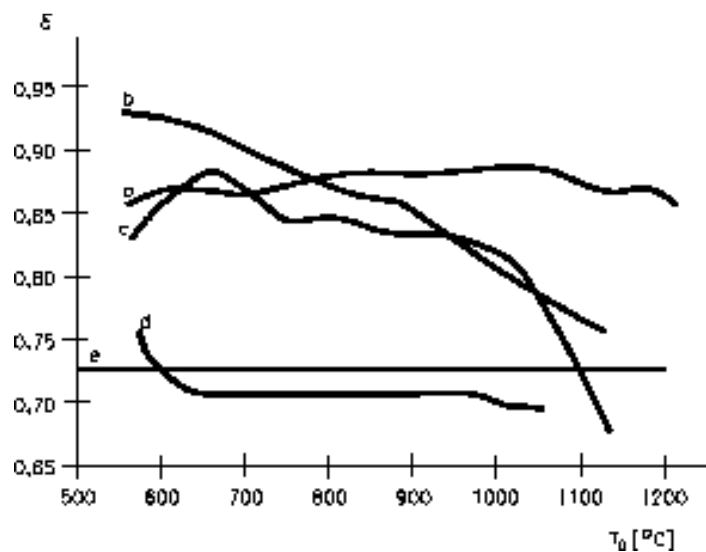
$$Bi = \frac{\alpha \cdot \Delta x}{\lambda} \quad (4.6)$$

Aby byly splněny podmínky konvergence, musí platit:

$$\Delta \tau_{\max} = \frac{\Delta x^2}{4 \cdot a \cdot (Bi + 1)} \quad (4.7)$$

Pro dosažení do rovnic 4.1 až 4.7 je třeba nejprve spočítat součinitele přestupu tepla.

V rekuperaci je složka zářením tvořena pouze zářením spalin. Pro výpočet součinitele přestupu tepla spalinami lze použít rovnice 3.4 až 3.18. Hodnoty analogické s hodnotami v tabulce 3.9 se budou měnit v závislosti na vstupní teplotě a rozměru bram. Emisivita bramy se odečítá z grafu 4.3.:



Graf 4.1 Emisivita oceli (písmeno b) [12]

V případě konvekce se jedná o laminární obtékání desky. Součinitel přestupu tepla konvekcí se získá z rovnice 3.19, kde charakteristický rozměr L je šířka bramy a Nusseltovo číslo z rovnice:

$$Nu = 0,67 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (4.8)$$

Vlastnosti spalin jsou uvedeny v tabulce 3.7. Re z rovnice 3.31, kde je místo d_h charakteristický rozměr L – šířka bramy. Celkový součinitel přestupu tepla pro horní a spodní stěnu bramy se počítá ze vztahu 3.25. Konvekční složka se neprojevuje na bočních stěnách bramy, proto je zde součinitel přestupu tepla roven součiniteli pro spaliny.

4.2. Ohřev v oblasti předeřevu a 1. části ohřevu

Pro výpočet nestacionárního vedení tepla platí stejné vztahy, jako v rekuperaci (4.1 až 4.7).

V této zóně je složka zářením tvořena zářením spalin a plamene. Pro výpočet součinitele přestupu tepla spalinami lze použít rovnice 3.4 až 3.18. Hodnoty analogické s hodnotami v tabulce 3.12 se budou měnit v závislosti na vstupní teplotě a rozměru bram. Emisivita bramy se odečítá z grafu 4.1.

Součinitel přestupu tepla záření plamene se vypočítá z rovnice 3.35. Pro horní stěnu bramy platí rovnice 3.36. Pro boční stěny platí vztah:

$$\alpha_2 = \alpha_{1,sp} + \alpha_{1,pl} \quad (4.9)$$

Pro spodní stěnu rovnice 3.25, kde se nahrazuje α_3 za α_1 .

4.3. Ohřev v oblasti 2. části ohřevu a vyrovnávání

Pro výpočet nestacionárního vedení tepla platí stejné vztahy, jako v předchozích dvou zónách (4.1 až 4.7).

V této oblasti je složka zářením tvořena rovněž zářením spalin a plamene. Pro výpočet součinitele přestupu tepla spalinami lze použít rovnice 3.4 až 3.18. Hodnoty analogické s hodnotami v tabulce 3.19 se budou měnit v závislosti na vstupní teplotě a rozměru bram. Emisivita bramy se odečítá z grafu 4.1.

Součinitel přestupu tepla záření plamene se vypočítá z rovnice 3.35. Pro horní a spodní stěnu bramy platí rovnice 3.36, jelikož se hořáky nacházejí i ve spodní části této

oblasti. Pro boční stěny platí vztah 4.9. Výpočtový program v příloze 7, výsledky doby ohřevu pro 12-ti a 18-ti metrové bramy v příloze 10. Pro 15-ti metrové bereme střední hodnoty mezi nimi.

5. Průběh chladnutí bramy [7, 8, 10]

Po vytažení z pece je brama umístěna na válečkový dopravník, odkud putuje k válcovací trati. Pokud je válcovací trať plná, brama zůstává na místě a chladne. Aby mohla pokračovat k válcování, je třeba ji znovu ohřát na požadovanou teplotu.

Teplo sdílené při chladnutí je složeno ze složky záření bramy a konvekční složky. Chladnutí bramy lze brát za volnou konvekci v neomezeném prostoru.

Součinitel přestupu tepla konvekcí se vypočítá z rovnic 3.26 až 3.29.

Konstanty c a n ve výpočtu Nusseltova kritéria jsou voleny podle součinu $Gr \cdot Pr$:

$$5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr < 2 \cdot 10^7 \quad c = 0,54 \quad n = 0,25$$

$$2 \cdot 10^7 < Gr \cdot Pr \quad c = 0,135 \quad n = 1/3$$

U desek obrácených teplou stranou nahoru se zvětšuje c o 30 %, u desek obrácených teplou stranou dolů se zmenšuje c o 30 %. Pro svislé stěny je L výška, pro vodorovné desky pak kratší strana. Určovací teplotou je střední teplota mezi stěnou a okolím.

Vzduch	
λ_{500}	$5,74 \cdot 10^{-2} \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_{600}	$6,22 \cdot 10^{-2} \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
λ_{700}	$6,71 \cdot 10^{-2} \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Pr_{500}	$6,87 \cdot 10^{-1}$
Pr_{600}	$6,99 \cdot 10^{-1}$
Pr_{700}	$7,06 \cdot 10^{-1}$
ν_{500}	$7,94 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ν_{600}	$9,69 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ν_{700}	$1,15 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Tabulka 5.1 Vlastnosti vzduchu

Složku radiace lze spočítat z rovnice:

$$\alpha_{rad} = \frac{q_{rad}}{t_s - t_0} \quad (5.1)$$

$$q_{rad} = \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_o^4) \quad (5.2)$$

Emisivita bramy ε_s se odčítá z grafu 4.1, teplota okolí je 70 °C.

Celkový součinitel přestupu tepla pak je:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_{rad} \quad (5.3)$$

Chladnutí lze řešit stejným způsobem, jako ohřev. Proto platí stejné vztahy pro nestacionární vedení tepla (rovnice 4.1 až 4.70). Výpočtový program v příloze 8, výsledky s grafy chladnutí v příloze 9.

6. Vliv na spotřebu plynu

Spotřebu plynu na ohřev lze chápat analogicky jako dobu potřebnou k ohřevu materiálu. Aby byla ohřívací pec co nejúčinněji využívána, bylo by ideálním stavem, kdyby byla vsázka stejných rozměrů, vstupní teploty a stejného materiálu. Proto byl při výpočtu času potřebného k ohřátí bramy v kapitole 5. brán zřetel na plynulost ohřevu bramy v peci. Toho lze dosáhnout rozdělením celkového času rovnoměrně na každou ze zón. Vztahy mezi jednotlivými časy v zónách jsou závislé na rozměrech zóny.

Platí:

$$\tau_c = \tau_{rek} + \tau_1 + \tau_2 \quad (6.1)$$

kde τ_c je celková doba ohřevu, τ_{rek} čas v rekuperaci, τ_1 čas v předehřevu a τ_2 ve vyrovnávání. Pro jejich vzájemný vztah platí:

$$\tau_2 = 1,29 \cdot \tau_1 \quad (6.2)$$

$$\tau_{rek} = 0,856 \cdot (\tau_1 + \tau_2) \quad (6.3)$$

Z vypočtených hodnot ohřevu (Příloha 10) lze vyčíst, že nejvyšší spotřeba plynu je při ohřevu na teplotu 1290 °C. Se snižující cílovou teplotou se snižuje doba ohřevu, nikoli však lineárně, ale exponenciálně. Vsázecí teplota rovněž ovlivňuje celkovou dobu ohřevu. Hodnoty v příloze 10 jsou celkovým časem v peci. Nelze porovnávat konkrétní hodnoty, ale pro vsázecí teplotu 800 °C a 900 °C je nutno pro srovnání odečíst čas v rekuperaci (z rovnic 6.1 až 6.3). Pokud by byla brama vsazena hned do ohřívacích zón, doba ohřevu by se prodloužila. Z hlediska rozměrů bram se jednotlivé časy liší v řádu několika minut, nicméně při plném provozu to hraje svou roli. Spotřeba z hlediska materiálu je závislá na měrné tepelné kapacitě daného materiálu. Jelikož převážná většina výrobků je z konstrukční oceli, výpočty se zaměřily na tento materiál.

7. Závěr

Tuto práci lze z hlediska obsahu rozdělit na tři části. V první je popsána technologie výroby za tepla válcovaných pásu na závodě 16 – Minihut Pásová společnosti ArcelorMittal. Druhá část obsahuje výpočty tepelné bilance ohřívací pece, ideální doby ohřevu a průběhu chladnutí ohříváné materiálu (při maximálním výkonu pece). Třetí pak zahrnuje excelovské soubory s vloženými moduly Visual Basicu, které slouží k výpočtu průběhu ohřevu a chladnutí materiálu. Jejich pomocí pak může obsluha pece počítat nové výsledky pro hodnoty, které si sama určí. Řešení obsahuje grafické znázornění růstu (poklesu) průměrné teploty materiálu a dvourozměrné rozložení teplot v materiálu.

Z hlediska konkrétních hodnot zadaných zadavatelem práce lze říci, že spotřebu plynu nejvíce ovlivňuje konečná požadovaná teplota. Čím více se blíží teplotě v peci, tím se prodlužuje doba ohřevu. Výraznou měrou pak ovlivňuje konečnou dobu ohřevu také vsázecí teplota bramy. Pokud by byl provoz pece plynulý, bramy se v rekuperační oblasti nestačí ohřát na teplotu stejnou, jako by byly vsazeny přímo z kontilití. Tím pádem dochází k časovým ztrátám. Z toho důvodu by se mělo synchronizovat kontilití s ohřevem materiálu. Rozměry materiálu mají vliv na dobu ohřevů taktéž, nicméně oproti předchozím dvěma mnohem méně ovlivňují celkovou dobu ohřevu.

Chladnutí bram na volném vzduchu je závislé na počáteční teplotě bram. Teplejší bramy chladnou rychleji, než chladnější. Při počátečním rozdílu 30 °C je rozdíl teplot za 10 minut pouhých 10 °C. Z pohledu rozměrů chladne větší brama pomaleji. Na 25 cm šíře cca o 6 – 7 °C.

8. Použitá literatura a zdroje

- [1] Ploché výrobky válcované za tepla (*výrobní program*), Arcelor Mittal a.s., Ostrava, 2008.
- [2] < <http://hdl.handle.net/10084/51455> > - diplomová práce.
- [3] FORMÁNEK, Ivo. Komplexní automatizace válcovacích tratí II. In Sborník XXIII. Semináře ASŘ, VŠB-TU Ostrava 1999. Článek [online]. 1999 [cit. 19.října 2008]. Dostupné z WWW:
< <http://www.fs.vsb.cz/akce/1999/asr99/Proceedings/papers/35/35.htm> >.
- [4] < <http://hdl.handle.net/10084/56197> > - bakalářská práce.
- [5] < <http://hdl.handle.net/10084/35649> > - diplomová práce.
- [6] ŠTĚTINA, J. Modelování tepelných pochodů kontilit oceli. [cit. 19.října 2008]. Dostupné z WWW:
< <http://ottp.fme.vutbr.cz/vyzkum/kontiliti01.php> >.
- [7] BLAHOŽ, V., KADLEC, Z. Základy sdílení tepla. 2.vyd. Ostrava: Cicero, 2000. 110 s. Edice SPBI Spektrum, ISBN 80-902001-1-7.
- [8] KADLEC, Z. Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty. 1.vyd. VŠB-TU Ostrava, 2009. 100 s., ISBN 978-80-7385-061-6.
- [9] ŠORIN, S.,N. Sdílení tepla. 1.vyd. Praha: SNTL, 1968. 398 s.
- [10] KADLEC, Z. Termomechanika – návody do cvičení. 2.vyd. VŠB-TU Ostrava, 2008. 100 s., ISBN 978-80-248-1736-1.
- [11] ČECH, B., KADLEC, Z. Měření teplot v energetice. 1.vyd. VŠB-TU Ostrava, 2008. 64 s., ISBN 978-80-248-1861-0.
- [12] SZERUDA R. Základy bezdotykového měření teploty pásmovým radiačním pyrometrem. 2004 [cit. 19.října 2008]. Dostupné z WWW:
< <http://pyrometrie.sweb.cz/Zaklady.htm> >.
- [13] NOSKIEVIČ, P. Spalování uhlí. 2.vyd. VŠB-TU Ostrava, 2005. 66 s., ISBN 80-248-0204-X.
- [14] Materiálové listy vyzdívky pece. Promoref, Nanterre, 1998.

9. Seznam příloh

Příloha 1:	Schéma rozdělení tepelných zón
Příloha 2:	Schéma rozdělení ohřívacích zón pece
Příloha 3:	Schéma rozměrů a rozdělení ohřívací pece
Příloha 4:	Schéma válcovacího tratě [5]
Příloha 5:	Diagramy pro určení emisivity CO ₂ a H ₂ O spalin [8]
Příloha 6:	Soubor Energetická bilance pece.xlsm (.xls)
Příloha 7:	Soubor Ohřev.xlsm (.xls)
Příloha 8:	Soubor Chladnutí.xlsm (.xls)
Příloha 9:	Soubor Grafch.xlsx (.xls)
Příloha 10:	Doba ohřevu konstrukční oceli
Výkres 1:	Výkres ohřívací pece
CD – ROM:	Bakalářská práce v elektronické podobě, výpočtové programy